

開水路底面に設置された矩形ブロックに 作用する瞬間圧力および瞬間水深の計測

MEASUREMENTS OF INSTANTANEOUS PRESSURE ON RECTANGULAR BLOCK CONSTRUCTED ON CHANNEL BED AND INSTANTANEOUS FLOW DEPTH

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・造士快竹³・森大輔⁴

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yoshitake ZOSHI and Daisuke MORI

¹正会員 博(工) 九州工業大学大学院准教授 建設社会工学研究系(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系

³学生員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻前期課程

⁴学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

A revetment block is sometimes destroyed due to the instantaneous pressure fluctuations during the flood. Time-averaged hydrodynamic forces acting on a rectangular block were almost clarified. However, the instantaneous pressure acting on a rectangular block has not been measured. In this study, simultaneous measurements of instantaneous flow depth and instantaneous pressure on the bed were conducted with a PTV and ultrasonic wave gauges. It was found that the vortex is generated behind the block and its Strouhal number is constant, irrespective of the Froude number. In contrast, the period of the free surface fluctuation behind the block becomes large with an increase of the Froude number. The free surface fluctuation affects on the pressure fluctuation on the bed when the Froude number is high.

Key Words : *rectangular block, PTV, simultaneous measurement, instantaneous pressure*

1. はじめに

一般に、都市河川の河道幅や河床高を大幅に変更することは、用地買収やコスト面から極めて困難である。三面張りなどによって水生生物が激減してしまった都市河川を、少しでも水生生物が生息しやすい川に再生するためにブロックが設置されることがある¹⁾。ところが、ブロックは局所的な粗度の増加をもたらすため、洪水時の局所的な水位上昇等に配慮する必要がある。また、ブロックが洪水時に流出しない耐力を持たせる必要もある。そのため、開水路底面に設置されたブロックに作用する流体力や抵抗を解明する研究が行われてきた。

福岡ら²⁾は矩形ブロックの間隔を系統的に変化させた状態で流水させ、3分力計を用いて矩形ブロックに加わる流体力を計測した。その結果、水位がブロック天端よりも低い非水没タイプでは、ブロック前後の圧力がほぼ静水圧分布で近似できることを示した。内田ら³⁾は矩形ブロックの配列を整列および千鳥に設定し、ブロック間隔や流量を変化させて3分力計を用いて流体力を計測した。その結果、水没タイプの場合はブロック前後の水圧

が非静水圧分布になることを示した。重枝ら^{4,5)}は単一の矩形ブロックにおいて相対水深、レイノルズ数、フルード数を系統的に変化させて3分力計を用いて流体力を計測し、相対水深が2以上の常流ではレイノルズ数およびフルード数の影響を受けずに抵抗係数が1.05～1.20の一定値を示すことを解明した。以上のように、矩形ブロックに作用する時間平均の流体力はほぼ解明された。しかし、中川ら⁶⁾は瞬間的な圧力低下等によって護床工が破壊されることを指摘している。そのため、ブロックに作用する瞬間的な流体力あるいは瞬間圧力の定量的解明が求められる。

山本ら⁷⁾は4分力計を用いて護岸ブロックに作用する流体力を30Hzの計測周波数で測定し、変動成分が正規分布で表現できることを示した。川口ら⁸⁾は護床工下流の河床面に作用する流体力を3分力計で計測し、水面変動に伴って流体力が変動することを示した。鬼束ら⁹⁾は跳水の直下流に設置されたブロックに作用する流体力を3分力計で計測し、変動成分を考慮したブロックの安定基準を提案した。内田ら¹⁰⁾は段落ち部下流の流況を波状跳水、潜り噴流および射流にそれぞれ設定し、礫河床に作

用する流体力を3分力計で計測した。その結果、流体力の変動成分の大きさが流況によって大幅に変化することを示し、瞬間的な流体力の評価の重要性を示唆した。前野ら^{11,12)}も堰下流部の連結石礫に作用する流体力を4分力計を用いて計測し、時間平均の抗力が正であっても、瞬間的には負の抗力が発生する場合があることを示した。

一方で、開水路底面に設置されたシルに作用する圧力の計測も行われてきた。Karki¹³⁾は強制跳水の下流底面に設置されたシルに複数の圧力穴を開けてフレキシブルチューブを接続し、時間平均圧力を計測した。Ohtsu *et al.*¹⁴⁾や安田・大津¹⁵⁾も同様な実験を行い、シル前面に作用する圧力分布が静水圧分布と異なり変曲点を有する形状になることを示した。以上のように開水路底面に設置された矩形ブロックに作用する時間平均圧力に関しては多くの研究があるものの、瞬間圧力の計測はほとんどなされていない。なぜなら、目視によってマノメータ内の水位を計測する場合、瞬間的な値の確認および記録が極めて困難だからである。ただし、近年の可視化手法の技術を応用すれば、この問題を解決することが可能である。

本研究は、開水路底面に設置された矩形ブロックおよびその周辺の底面に複数の圧力穴を設けてフレキシブルチューブを接続し、可視化手法を用いて瞬間圧力値を計測すると共に、超音波波高計を用いて水面変動を同時計測したものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に示す長さ4.2m、幅 B 0.4m、高さ0.27mの水路 upstream 端から3.8m下流の水路中央底面に3辺の長さ k が全て0.03mの矩形ブロックを設置した。流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸、横断方向に z 軸をとる。ブロックよりも上流側の2カ所(No.1~2)の底面、ブロックの上流側鉛直壁面、天端壁面および下流側鉛直壁面の3カ所(No.3~5)およびブロックよりも下流側底面の3カ所(No.6~8)に直径6mmの孔を開け、その内部に硬質なビニールチューブを壁面に直角に埋め込んだ。各ビニールチューブの末端は水路右岸壁面に鉛直に固定した。そのため、チューブ内の瞬間水位は孔に作用する瞬間圧力と孔に直角に接近する瞬間流速によって決定される。

表-1に示すように、ブロックよりも2m上流(以後、基準断面と呼称する)の水深 H_0 を一定にして、フルード数 $Fr_0 \equiv U_m / \sqrt{gH_0}$ を系統的に変化させた。ケース名につけられた数字はフルード数を意味する。本条件内ではブロックの抗力係数および揚力係数はフルード数およびレイノルズ数 $Re_0 \equiv H_0 U_m / \nu$ の影響を受けない^{4,5)}。ここに、 U_m は断面平均流速、 g は重力加速度、 ν は動粘性係数である。

ビニールチューブ末端にハロゲンライトを照射させて

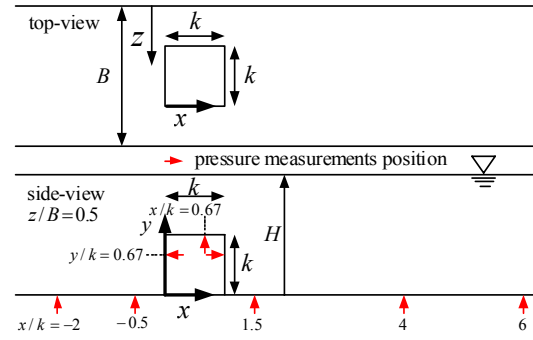


図-1 実験装置の概要

表-1 実験条件

CASE	B/k	H_0/k	Re_0	Fr_0
F01	13.3	2.0	4600	0.1
F03	13.3	2.0	13800	0.3
F05	13.3	2.0	23000	0.5
F07	13.3	2.0	32200	0.7

$t = 1/30(s)$ $3/30(s)$ $6/30(s)$ $10/30(s)$

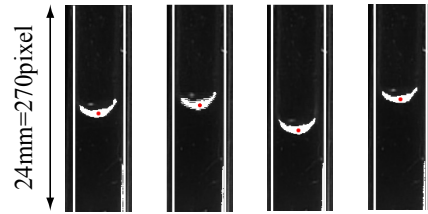


図-2 チューブ内水面の2値化

チューブ内の水面を光らせ、画素数1440×1080、シャッター速度1/500sで各ビニールチューブの水位を1/30sごとに75s間ビデオ撮影した。このとき、超音波波高計を用いて各孔の真上の水位を1/30sごとに75s間同時計測した。両計測を同期させるために、1.5Vの豆電球をビデオカメラの視野内に設置し、撮影開始直後にoffからonにして、その電圧変化を超音波波高計のデータと共にPCに記録した。計測後に豆電球が光り始めた時間と、圧力計測において0Vから1.5Vに上昇した時間を改めて0sと定義した。なお、ビニールチューブ内の水位は各孔における圧力だけでなく壁面に直角方向の乱流成分にも影響を受けるが、両者を分離することは困難なので、本研究では両者による作用を「圧力」と呼称する。なお、ビニールチューブ内の水位はチューブ内壁による摩擦抵抗や表面張力およびチューブ形状の影響を受けるため、チューブ長を系統的に変化させてこれらの影響を除去する鬼束ら⁹⁾の方法を採用した。計測後、図-2に示すようにビニールチューブ内の水面が周囲と区別できるように画像を2値化し、PTV(Particle Tracking Velocimetry)を用いて瞬間圧力を算出した。

応答時間0.05s、プローブの直径 ϕ が4mmの2成分電磁流速計を用いてブロック周辺の x 、 y 軸方向の瞬間流速 $\tilde{u} = U + u$ 、 $\tilde{v} = V + v$ を1/30sごとに68.8s間計測した。ここに、大文字は時間平均値を、小文字は変動成分を示し、

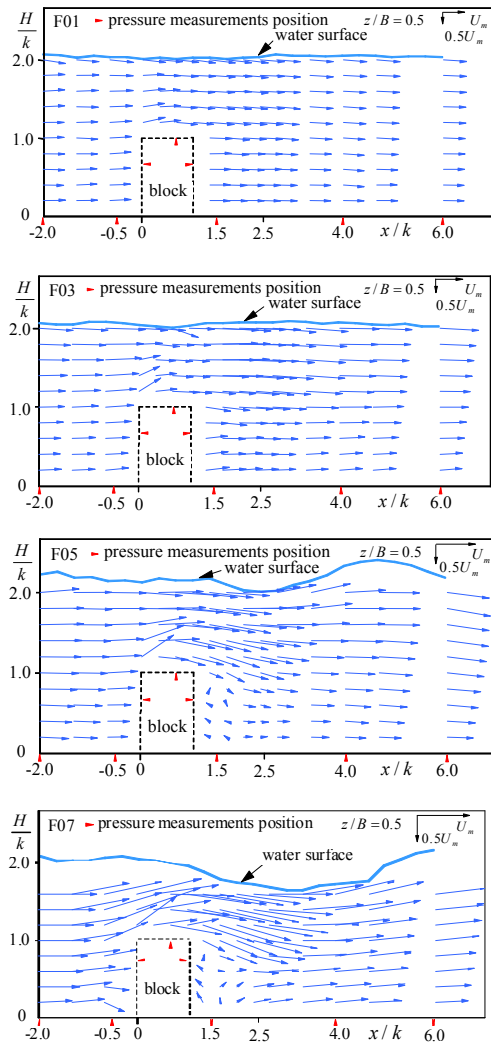


図-3 流速ベクトル図

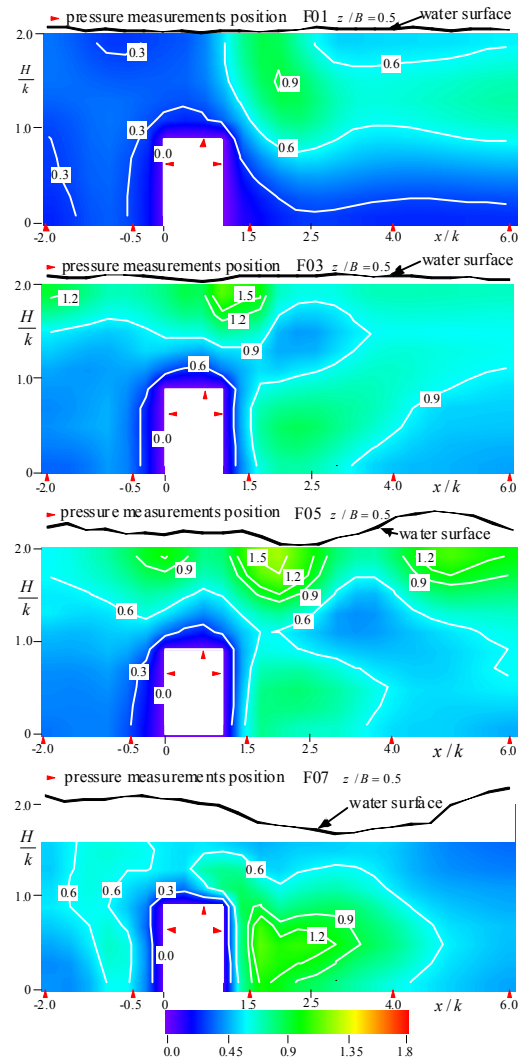


図-4 v'/u' のコンター図

圧力、水深も同様に $\tilde{p} = P + p$, $\tilde{h} = H + h$ と定義する。また、変動成分の標準偏差はプライムをつけて表す。

3. 実験結果および考察

(1) 時間平均乱流諸量

図-3に基準断面の断面平均流速 U_m で無次元化された流速ベクトルおよび時間平均の水面形を示す。低フルード数では水面形がほぼフラットだが、フルード数の増加に伴いブロック下流の水面形が大きく上下に変化している。また、水深のピークはF05では $x/k \approx 5$ であるが、F07では $x/k > 6$ となっている。水面形の影響を受け、ブロック下流の水面近傍の流向は低フルード数では比較的底面に平行だが、高フルード数になると水面形に平行になる。本実験条件ではケース毎にフルード数のみならずレイノルズ数も変化するが、図-3よりケース間の水面形の相違が顕著であることから、フルード数が支配的パラメータであると推定される。

図-4に各ケースの乱れ強度比 v'/u' を示す。ブロック下流域において乱れ強度比 v'/u' の増加が観察され、その値がフルード数の増加に伴い増加している。これは、フルード数の増加に伴いブロック下流の渦度が増加し、しかも図-3よりブロック下流における流速の水深方向変化がフルード数の増加に伴い顕著となったため生じたものである。このことから、流れが3次元になることが示唆され、ブロック上流と比べブロック下流の乱れが等方的になったと考えられる。

(2) 瞬間水深と瞬間圧力の特性

図-5に基準断面の水深 H_0 で無次元化した水面変動の標準偏差 h' の流下方向変化を示す。F01ではブロック近傍とブロックから離れた領域の h'/H_0 はほぼ一定である。フルード数の増加に伴い全領域で h'/H_0 は増加するが、F05ではブロック下流で特に増加している。F07はブロック近傍の下流域で h'/H_0 が局所的に減少する領域があるが、多くの領域では増加傾向にあり、また、上流域でも増加している。このように高フルード数において、

ケース間で差が生じたのは、図-3に示した水面形から確認できるように、高フルード数では低フルード数に比べ水面近傍の鉛直方向流速成分が増加するからと考えられる。

図-6に基準断面の圧力 $\rho g H_0$ で無次元化した圧力変動の標準偏差 p' の流下方向変化を示す。フルード数の増加に伴い全領域で $p'/\rho g H_0$ は増加している。ただし、図-5に示した h'/H_0 は高フルード数のF05およびF07においてブロック下流域で流下方向に増加傾向を示すのに対し、 $p'/\rho g H_0$ は減少している。これは、両者の変動特性に高い相関がないことを示唆している。

i 点の変動成分 w_i と j 点の変動成分 w_j との相互相関係数 $R_{ij}(\tau)$ は次式で求められる。

$$R_{ij}(\tau) \equiv \overline{w_i(t) \cdot w_j(t+\tau)} / (\overline{w_i^2} \cdot \overline{w_j^2}) \quad (1)$$

ここに、 τ は遅れ時間である。式(1)において、 $w = p$ 、 $j = i$ として求めた圧力の自己相関係数 $R_{pi,pi}(\tau)$ の一例(F03)を図-7(a)に示す。 $R_{pi,pi}(\tau)$ は1から減少した後に極大値、極小値を示している。そこで、 $R_{pi,pi}(\tau)$ が始めに有する極大値をセカンドマキシマムと命名し、図中に下向きの矢印で示した。また、変動周期を発生遅れ時間と定義する。なお、セカンドマキシマム以後にも増減が見られるが、それぞれの極大値が周期とほぼ等しいと考えられる。

式(1)において、 $w = h$ 、 $j = i$ として求めた水深の自己相関係数 $R_{hi,hi}(\tau)$ の一例(F03)を図-7(b)に示す。 $R_{pi,pi}(\tau)$ と同様にセカンドマキシマムが観察されるが、両者の発生遅れ時間が異なることが注目される。両者に差があることは他のケースでも観察された。

(3) 水深と圧力の変動周期

$R_{pi,pi}(\tau)$ および $R_{hi,hi}(\tau)$ においてセカンドマキシマムが発生する時間をそれぞれ τ_{pmax} 、 τ_{hmax} と名付け、図-8にその流下方向変化を各ケース示す。 τ_{pmax} は全体的にフルード数の増加に伴い低下しているのに対し、 τ_{hmax} の値は増加していることが認められる。ところで、物体背後に発生する渦の周期はストローハル数 St によってしばしば整理される。

$$St \equiv k / (\tau \cdot U_m) \quad (2)$$

式(2)の τ に τ_{pmax} 、 τ_{hmax} をそれぞれ代入して求めたストローハル数 St_p 、 St_h の流下方向変化を図-9に示した。F01以外ではブロック上流域で St_p は余り一致していないが、ブロック下流では一定の値を有しておりほぼ一致している。なお、岡島¹⁰⁾は $Re=10^2 \sim 10^5$ の条件下で正方形断面柱を用いた風洞実験を行い、高レイノルズ数域

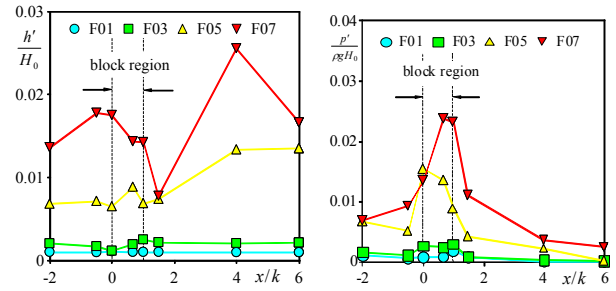


図-5 水深のRMS値

図-6 圧力のRMS値

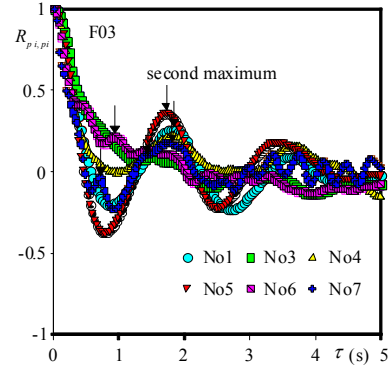


図-7(a) 圧力の自己相関係数

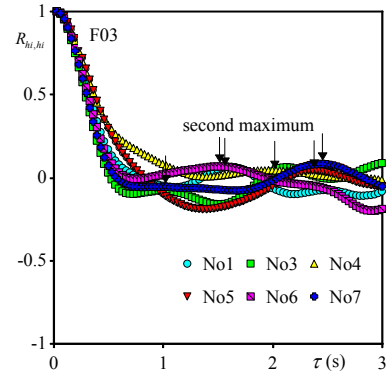


図-7(b) 水深の自己相関係数

($Re > 3.0 \times 10^3$)ではブロック背後のストローハル数は0.13前後で一定値をとることを解明した。

F01では図-3に見られたようにブロック背後で顕著な剥離渦が発生しておらず、底面の圧力変動に及ぼす渦の影響が微小であったと考えられる。一方、 St_h については、ブロックの上流だけでなく下流においても全てのケースで一致しない。これは、ブロック背後に発生する渦によって水面変動周期が影響を受けていないことを示唆する。

式(1)において、 $w = v$ 、 $j = i$ として求めた鉛直方向流速の自己相関係数 $R_{vi,vi}(\tau)$ を求め、さらに、セカンドマキシマムが発生する時間 τ_{vmax} を求めて図-10に各ケース示す。フルード数の増加に伴い、水面付近で高周期となっているのに対し、底面付近では余り変化していない。したがって、水面付近および底面付近の流速変動は水面およびブロック背後に発生する渦によってそれぞれ支配的に決定されていると推測される。

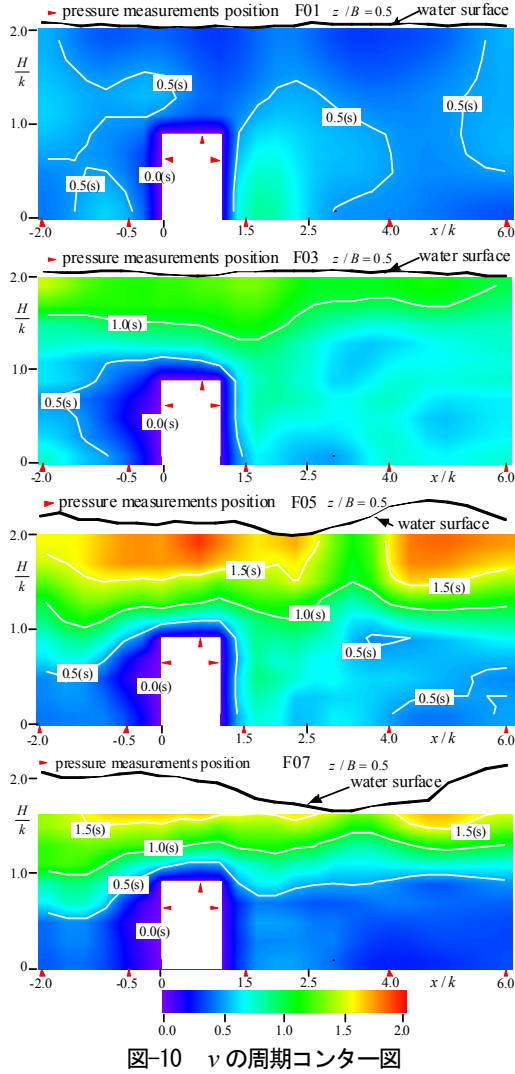
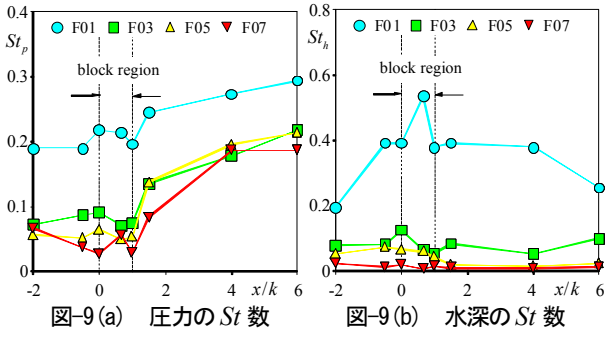
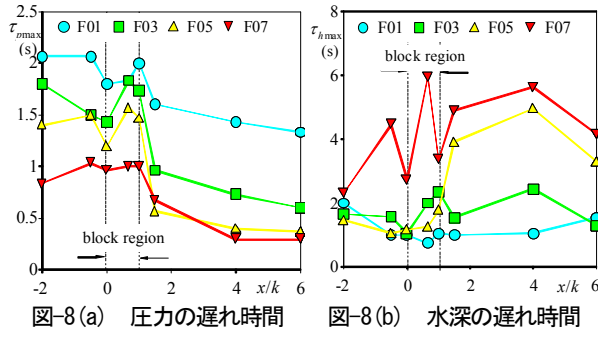


図-10 v の周期コンター図

(4) 水深変動と圧力変動の相互相関

式(1)において、 $w_i = h_i$ 、 $w_j = p_i$ として求めた水面と圧力の相互相関係数 $R_{hi,pi}(\tau)$ の例を図-11に示す。F01の場合は、 $R_{hi,pi}(\tau)$ がほぼ0付近を変動しており、水面変動と圧力変動との間に相互関係がほとんどないことを示している。ところで、棚津・中山¹⁷⁾は開水路等流ではフルード数が変化しても水面変動と底面変動の相関が小さいことを示した。横嶋・中山¹⁸⁾の行ったDNSにおいても、水面変動と鉛直流速変動の相関係数は水面近傍で大きな絶対値を示すものの、底面付近では0.04以下であることを示した。宮本・下山¹⁹⁾も同様な結論を実験から得

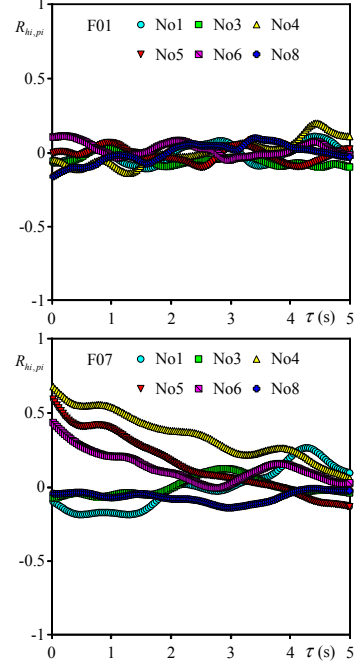


図-11 水深と圧力の相互相関係数

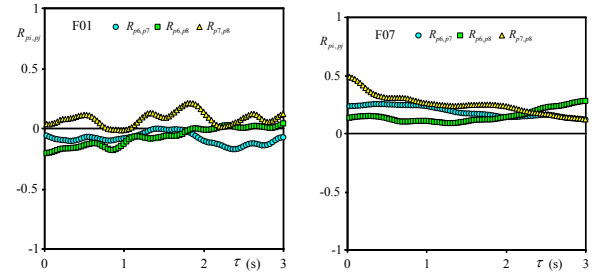


図-12 No. 6, No. 7およびNo. 8の圧力の相互相関係数

られている。ここで、図-3~4に示されたように、低フルード数のF01ではブロック背後で発生する渦の影響を余り受けないため、上流域と下流域の流れに大きな差異は生じていない。従って、ブロックの設置されていない等流の結果と類似した結果になったと考えられる。一方、フルード数の高いF07では、 $R_{hi,pi}(\tau)$ は $\tau = 0(s)$ においてブロック上流ではほぼゼロなのに対し、ブロック下流側では高い値を示している。これは、フルード数の増加に伴いブロック下流側では水面変動と圧力変動の関連が高くなることを意味している。

式(1)において、 $w = p$ 、 $i = 6, 7$ 、 $j = 7, 8$ として求めた圧力の相互相関係数 $R_{pi,pj}(\tau)$ を図-12に示す。F01の

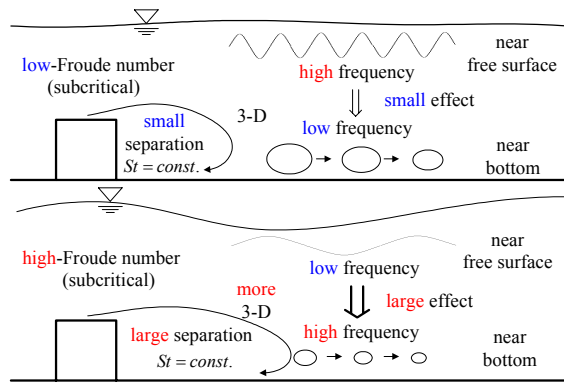


図-13 矩形ブロック背後の流れ場の模式図

場合は遅れ時間 τ の大小に関わらずゼロに近い値を示している。一方、F07の $R_{pi,pj}(\tau)$ は遅れ時間 $\tau=0$ の時に0.2～0.4程度の値を有し、その値が遅れ時間 τ が増加してもほぼ変化しない。これは、ブロック直下流の圧力変動が下流にそのまま移流して影響を与えているのではなく、同位相で変動していることを示唆する。図-2および図-8(b)よりフルード数の増加に伴い水面形が流下方向に大規模に変化すること、また、その変動周期が増加することを考慮すると、ブロック下流の大規模な領域で水面が変動し、その影響が底面の圧力を20～40%程度決定していると推測される。

4. おわりに

本研究は、開水路底面に設置された矩形ブロックおよびその周辺の底面に作用する瞬間圧力を可視化手法を用いて計測すると共に、超音波高計を用いて水面変動を計測したものである。その結果、図-13に示す乱流構造が解明された。ブロックから剥離する渦の大きさはフルード数の増加に伴い減少する。そのため、ブロック下流側の3次元性が増す。フルード数が増加すると流速が増加するのでブロックからの剥離渦の周波数は増加するが、ストローハル数は変化しない。一方、フルード数の増加に伴い水面が流下方向に大規模に変化すると共に水面変動の周波数が低下する。低フルード数の場合は水面変動が底面圧力に及ぼす影響は微小であるが、高フルード数になると底面圧力に影響を及ぼすようになる。今回のケースではフルード数が0.7の時に、水面変動が底面変動の20～40%程度支配していると推測された。

謝辞： 研究に協力いただいた本学大学院生の小野篤志氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 樋口明彦, 川からのまちづくり研究会：川づくりをまちづくりに, 学芸出版社, p.135-145, 2003.
- 2) 福岡捷二, 川島幹雄, 横山洋, 水口雅教：密集市街地の氾濫

シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究, 土木学会論文集, No.600/II-44, pp.23-36, 1998.

- 3) 内田龍彦, 福岡捷二, 福島琢二, 田中正敏：大型粗度群上の浅い流れの平面二次元解析とその応用, 土木学会論文集, No.691/II-57, pp.93-103, 2001.
- 4) 重枝末玲, 秋山壽一郎, 野中雅之, 浅野孝典：定常自由表面流中の水没物体に働く流体力, 水工学論文集, 第48巻, pp.877-882, 2004.
- 5) 重枝末玲, 秋山壽一郎, 石原仁：常流あるいは射流中に置かれた水没状物体に働く流体力, 水工学論文集, 第50巻, pp.889-894, 2006.
- 6) 中川博次, 辻本哲郎, 清水義彦, 村上正吾：堰の一被災機構としての護床工からの砂のぬけ出しによる空洞化の進行過程, 第31回水理講演会論文集, pp.359-364, 1987.
- 7) 山本晃一, 林建二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一郎：護岸ブロックの抗力・揚力係数、および相当粗度の計測方法について, 水工学論文集, 第44巻, pp.1053-1058, 2000.
- 8) 川口広司, 諏訪義雄, 高田保彦, 末次忠司：護床工下の河床材料の抜け出し及び下流跳水の非定常性と護床工の応答特性, 河川技術論文集, 第8巻, pp.243-278, 2002.
- 9) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 重枝末玲, 尾関弘明, 後藤伸一, 白石達郎：平坦河床上に発生する弱跳水の水面変動および河床圧力変動の特性, 水工学論文集, 第51巻, pp.697-702, 2007.
- 10) 内田龍彦, 河原能久, 池田麻矢, 渡邊明英：段落ち部下流の礫河床に作用する流体力とその変動に関する基礎的研究, 第4回流体力の評価とその応用に関する講演集, pp.51-56, 2007.
- 11) 前野詩朗, 藤原実咲, 富田晃生, 山村明, 忖熊公子：連結石礫の流体力評価に関する研究, 水工学論文集, 第51巻, pp.679-684, 2007.
- 12) 前野詩朗, 山村明, 忖熊公子：堰下流部の連結石礫河床保護工の流体力評価, 水工学論文集, 第52巻, pp.715-720, 2008.
- 13) Karki, K.S.: Supercritical flow over sills, *J. Hydraulics Division*, Vol.102, No.10, pp.1449-1459, 1976.
- 14) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Yamanaka, Y.: Drag on vertical sill of forced jump, *J. Hydraulic Research*, Vol.29, No.1, pp.29-47, 1991.
- 15) 安田陽一, 大津岩夫：強制跳水水中の鉛直シルに作用する流体力に対する流入条件の影響, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, 第2巻, pp.17-22, 2003.
- 16) 岡島厚：種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ, 日本風工学会誌, 第17号, pp.1-19, 1983.
- 17) 禰津家久, 中山忠暢：自由水面近傍における組織渦の時空間相関構造に関する研究, 土木学会論文集, No.586/II-42, pp.51-60, 1998.
- 18) 横嶋哲, 中山昭彦：水面変動を伴う開水路乱流の直接数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.712/II-60, pp.57-72, 2002.
- 19) 宮本仁志, 下山顕治：開水路流れにおける水面変動と乱れの空間相関構造, 水工学論文集, 第47巻, pp.439-444, 2003.

(2008. 9. 30受付)